

南極地域の対流圏化学に関するシンポジウム報告*

伊藤 朋之^{*1}・青木 周司^{*2}・金森 悟^{*3}
 村山 昌平^{*4}・神山 孝吉^{*5}・山崎 孝治^{*6}
 松原 廣司^{*7}・大和 政彦^{*8}

はじめに

伊藤 朋之

1991年6月3日～6日に、米国コロラド州ボルダーのコロラド大学において標記国際シンポジウムが開催された。このシンポジウムは、IGBP (地球圏—生物圏国際協同研究計画) のコアプロジェクトの一つであるIGAC (地球大気化学国際協同研究) の活動の一環として行われたものである。IGAC は六つの主要課題からなるが、その一つ「大気組成変化における極域の役割」においては PAC (極域大気化学) 及び PASE (極域大気—雪氷実験) という二つの研究プロジェクトが実施されている。標記シンポジウムは PAC における1991年の重要な行事として計画されたものである。筆者は、シンポジウムの実行委員として計画段階からこれに関与していたこともあって、シンポジウムの成功を期して参加し、エーロゾルに関する研究発表を行い、また 大気—地表交換過程に関するセッションの座長をつとめた。

南極域 (60°S 以南) の対流圏は、北極域のそれと対照的に、海拔の高い雪氷大陸上に広がっており、生物活動の活発な広大な南氷洋に取り囲まれている。地球規模変化に関する研究の今日的焦点である南極の氷床 (コアサンプル) 及び成層圏 (オゾンホール) は、この南極対

流圏を介して、世界の大気・海洋と結び付いている。また南極対流圏内での化学過程は、多様な気候影響の潜在力を有しており、例えば、南極対流圏の雲核濃度の変化及びそれに伴う雲の微物理特性の変化は、高緯度海洋域の放射収支に重大な影響を及ぼす可能性がある。しかし、南極対流圏の化学及びその支配因子に関する組織的研究はこれまでほとんど行われておらず、今回のシンポジウムはそれを推進するための具体的な行動の第一歩と位置づけられる。

16か国から総計 91 編の発表があり、共著者を含め234名が参加者として登録された。日本からは、招待講演の山崎 (気象研) をはじめ 8 名 (編) が参加し、米国在住の大竹 (元アラスカ大学) 及び長田 (ニューヨーク州立大学) を加えて、地の利に恵まれた米国の39名 (編) を別として、イギリス、イタリアの 8 名を超える最大参加数であった。

初めの3日間は研究発表に、また、最終日は研究の将来計画に関するワークショップに充てられた。研究発表は、微量気体、雲・エーロゾル、雪氷化学歴史記録、輸送と放射、成層圏—対流圏交換及び大気—地表交換過程に分類され、口頭発表7セッションとポスターセッションで行われた。発表論文は Tellus 誌の特集号に投稿するよう勧奨されており、約30編が既に申し込みを済ませたと聞いている。ワークショップでは、上記分類の分科会討議を午前に行い、午後の総会において各分科会からの報告を全体で討議する形がとられた。この将来計画案は後日シンポジウム参加者に配布される。

以下、シンポジウムの各セッション毎に、トピックスを日本からの参加者各自の感想も交えて紹介したい。

セッション1：微量気体—I

青木 周司

このセッションでは気体成分に関する話題がとりあげ

* A Report on the Symposium on the Tropospheric Chemistry of the Antarctic Region.

*1 Tomoyuki Ito, 気象庁観測部.

*2 Shuhji Aoki, 国立極地研究所.

*3 Satoru Kanamori, 名古屋大学水圏科学研究所.

*4 Syohei Murayama, 東北大学 大気 海洋 変動観測研究センター.

*5 Koukichi Kamiyama, 京都大学 地球物理学 研究施設.

*6 Koji Yamazaki, 気象研究所.

*7 Kouji Matsubara, 気象庁観測部.

*8 Masahiko Yamato, 群馬大学教養部.

られた。まず、P.P. Tans (米国海洋大気庁 (NOAA)/CMDL) が二酸化炭素 (CO_2) とメタン (CH_4) に関して招待講演をおこなった。彼らのグローバルな観測ネットワークから得られた CO_2 データを用いて、モデルによりそのソースとシンクを見積った結果が示された。それによれば、化石燃料による CO_2 の放出量を除外すると、南半球では炭素量換算で年間 0.7 ギガトンが、また北半球では年間 2.5 ギガトンが大気から海洋や生物圏に吸収されていることになる。これは従来考えられてきたほど南半球の海洋がシンクの役割を果していないことを意味しており、大きな驚きを我々に与えた。また、南極域のデータを除くとシミュレートされた分布が大きくソース過剰に偏ることから、モデルにとって南極域での高精度観測が重要であることも示された。引続き村山 (東北大学)、L.N. Yurganov (ソ連、北極・南極研究所)、R.C. Schnell (コロラド大学/CIRES)、及び J. Rudolph (ドイツ、大気化学研究所) による対流圏オゾンまたはそれに関連した微量気体成分の話題が続いた。村山らは対流圏オゾンの時空間分布から南極域での大気輸送過程を明らかにした点で注目された。Yurganov らは南極域の地上オゾン、一酸化炭素 (CO) などの観測結果を対流圏光化学反応モデルを用いて解釈を試みており、興味深かった。Schnell らは南極点における地上オゾン濃度の最低値 (夏季に出現) の経年減少を、オゾンホールによる紫外線透過光の増加と 1970 年代終わりに起こったと推定される南極大陸上における夏季の風系場の大規模な変化に結びつけて解釈しており、南極域での地上オゾン濃度の経年変化を説明する新しい仮説として注目された。Rudolph らは 8 年間にわたる観測から、南極域における比較的反応性の低いメチルクロライドや非メタン炭化水素の仲間のエタンやアセチレンといった微量気体の主要なソースが南半球のバイオマス燃焼であること、また OH ラジカルやオゾンがシンクとなっていていずれも似たような季節変化をしていること (最高濃度が冬の終わりに、最低濃度が夏の終わりに出現する) を明らかにした。

気体関係のポスターは 14 件あり、そのうち地上オゾンが 6 件で一番多数が占め、 CH_4 及び CO_2 が 2 件、その他ジメチルサルファイド (DMS)、CO、ラドンなどが 1 件ずつであった。このなかで私が最も興味をもったのは、I. Levin (ドイツ、ハイデルベルグ大) による大気及び表面海水中の $^{14}\text{CO}_2$ と大気中の CH_4 の ^{14}C 、 ^{13}C 、 ^2H の同位体測定結果であった。 CO_2 に関しては大

気と海洋間の CO_2 交換について新たな情報を提供することになり、 CH_4 については、ソース、シンクについて新しい知見が期待されるからである。

今回のシンポジウムは学問的にも地域的にも領域が限定されていたため、比較的少人数でお互いの話をじっくり聞くことができ、私にとって大変有意義で楽しい時間を過ごすことができた。

セッション 2 : 雲とエアロゾル

金森 悟

今回のシンポジウムに出席して最も強く感じた研究の底流は、南極エアロゾルと気候変動との関連を明らかにしようとする動きであった。エアロゾルはそれ自身太陽光を散乱し、また凝結核や氷晶核として雲の生成に関与するので、太陽からの入射と地球からの放射を左右して大気の熱構造に大きな影響を与えるため、その変化は地球の気候変動と密接に関連していると考えられる。それらの点を意識して下記のように多くの基地で南極大気エアロゾルの長期連続観測が行われており、このセッションの発表の過半数は何らかの意味でエアロゾルの長期連続観測に関連していた。

米国 : Amundsen Scott South Pole (1974—)

オーストラリア : Mawson (1981—)

ドイツ : Georg von Neumayer (1982—)

ブラジル : Comandante Ferraz (1985—)

これらは単に大気物理学的だけでなく大気化学的な観測を含む基礎的で包括的な観測であり、時に昭和基地での断片的な観測が参照されると、経済大国日本として恥ずかしい気持ちを禁ずることが出来なかった。これらは凝結核濃度、エアロゾル散乱係数、40 元素以上の化学分析、粒径分布等の季節変化や年々変動のみならず ^{7}Be 、 ^{210}Pb 等を含み、網は成層圏まで広がっている。現在のところまだ結論は長期変動にまでは達していないが、メタンスルホン酸 (MSA)、海塩起源以外の硫酸イオン (nss-SO_4^{2-})、硝酸イオン (NO_3^-)、黒色炭素等の季節変化やモデル計算による化学元素のソース・プロファイル等が報告された。

南極エアロゾルの中で最も特徴的なのはイオウ化合物であるが、個々の粒子の観察だけでなく DMS、MSA、 SO_2 に関する報告は全てのセッションで頻繁に現れ、今やこれらの関係を定量的に説明することが求められている。また南極大気エアロゾルと南極域の雲や南極対流圏の熱構造との関連及び更に進んで近い将来には気候変動

との関連に関する報告が期待される。

セッション3：微量気体—II

村山 昌平

T.J. Conway (NOAA/CMDL) は彼らによって実施されているフラスコサンプリングネットワーク及び連続観測によって得られた CO_2 及び CH_4 の観測結果についての発表を行った。1988年及び1989年はそれ以前と比べて CO_2 濃度の南北両半球の較差が大きくなっていること、 CH_4 濃度の増加率が近年減少してきていることなどを報告し、これらが全球規模の炭素循環の変動の兆候なのか一時的なものなのかを明らかにするために南極域における観測が重要であることを述べた。

S.J. Oltmans (NOAA/CMDL) からは南極点基地 (SPO) における対流圏オゾン濃度の観測結果についての発表があった。近年、SPO では夏季の地上オゾン濃度が減少傾向を示しているが、これは成層圏オゾンの減少に伴い地上付近の紫外線入射量が増加し、光化学反応により地上付近のオゾンの分解される量が増えたのではないかとの見解が示された。また、南極域の地上付近のオゾン濃度の季節変動には、大気循環の季節変動とともに地上で受ける日射量の季節変動に伴う光化学反応によるオゾンの分解量の変動が関与しているのではないかと指摘があった。

青木 (国立極地研究所) は1988年より昭和基地で実施されている CH_4 濃度の連続観測についての発表を行った。高精度の測定システム及びそれによって得られた良質のデータに出席者の関心が集まった。また、同氏からも近年、 CH_4 濃度の増加率が減少してきているとの報告があった。

今回のシンポジウムは、大気化学全般を包括するものであったため今ひとつ突っ込んだ議論が行われなかった感があるが、初めて国際シンポジウムに出席し、論文上でしか知り得なかった各国の研究者とつたない英語ながらも話ができたことは非常に有意義であった。

最後になりましたが、今回のシンポジウム参加にあたり国際交流事業の一環として日本気象学会から旅費の援助を頂いたことを深く感謝致します。

セッション4：雪氷化学歴史記録

神山 孝吉

雪氷中の化学組成からわかる歴史的記録を扱った本セッションは、口頭発表が4日の午後には S. Harder (ワシ

ントン大学) と E.W. Wolff (自然環境研究協会/英国南極調査) を議長として開催された。本セッションでの招待講演者は M. LeGrand (フランス、環境雪氷学地球物理学研究所) である。以下に講演題目と講演者を講演順に挙げる。

- ① 南極の雪氷化学研究から得られた、硫黄と窒素の生物地球化学的物質循環像 (LeGrand, M.).
- ② 南極ウェッデル海域から採取した雪氷コアから考察した、海洋と大気の相互作用に時間変動が存在しているという証拠 (Peel, D. and Mulvaney, R.).
- ③ 南極バード基地の積雪についての新しい化学層序の試み (Langway, C.C. and Osada, K.).
- ④ 火山噴火によって引き起こされた南極大気の擾乱についての雪氷学的研究 (Delmas, R.J., Kirchner, S. and Palais, J.).
- ⑤ 極域水中の微粒子と不溶性のバックグラウンドエロゾル (Ram, M. and Gayley, R.I.).
- ⑥ 堆積速度の大きい氷床コアから得られた1841~1978年の対流圏メタンの変動 (Ethridge, D.M.).

ポスター発表の中で本セッションに関係するものは以下の4課題であった。

- ① 南極降雪中への重金属の季節的供給 (Suttie, E.D. and Wolff, E.W.).
- ② 南極半島の雪氷コアに見られる異常な海洋成分比 (Wolff, E.W. and Mulvaney, R.).
- ③ ロンネとエクストロム両棚氷地域の雪氷化学的研究 (Minikin, A., Moser, K. and Wagenbach, D.).
- ④ 南極半島のいくつかの雪氷コアでの、海塩起源以外の硫酸イオンとメタンスルホン酸の割合 (Mulvaney, R. and Peel, D.A.).

発表の全体を通した印象を以下に述べる。雪氷中の化学組成からわかる歴史的記録とはいっても時間スケールがさまざまで議論が絞りにくいのが、南極域の雪氷化学の現状といった意味では興味深かった。LeGrand は、ポストーク・コアの解釈から過去の気候環境下における硫黄の循環などを議論していたが、目新しい議論ではない。総じて雪氷試料の nss-SO_4^{2-} 、MSA、DMS などに着目し、大気物質循環に及ぼす広い意味での海洋の影響を雪氷圏から解読しようとする試みが注目を引いていた。

本セッションの主題は雪氷化学から過去の気候環境を推定しようとするものである。この研究には、気候環境が雪氷化学に反映される過程、及び現在保存されている

試料は、堆積当時の雪氷化学をいかに維持しているかの検証の二点が必要である。ポストーク・コアも一段落した現在、上記の検証のためにも、南極点、グリーンランド・サミットなどでの観測を位置づけており、現在推進しようとしているように思えた。

セッション 5 A : 輸送と放射

山崎 孝治

D.H. Bromwich (オハイオ州立大/バード極域研究センター) の「対流圏化学組成に関連する南極大気の振舞い」と題する講演でこのセッションの幕があいた。彼は主にカタバ風循環について話した。メソスケールモデルで静止した状態から48時間後には観測とはほぼ一致する地表付近のカタバ風循環が作られ、逆に上層では低気圧性循環が作られる事を示した。カタバ風は南極大陸沿岸のいくつかの箇所で見取して強風軸を形成する。また、海上(海氷上)にでたカタバ風ジェットは時折メソスケール渦を作ることを、衛星写真をみせながら紹介した。

C. Genthon (フランス, ドメイン大学) はゴダード宇宙科学研究所 (GISS) の大気大循環モデル (GCM) に砂漠(地表面)からの土壌粒子及び海面からの海塩粒子の放出, 大気中の輸送, 重力落下及び沈着過程を組み込んだトレーサーモデルを用いて, 現在と氷河期のこれらのエアロゾル粒子の南極への輸送のシミュレーションを行った。一般に南極での沈着量は, 土壌粒子の場合は夏に多く, 海塩粒子は冬に多い。また, 氷床コアの分析から氷河期にエアロゾルが多かったことが分かっているが, このシミュレーションでは現在のほうがやや少なくなっており, コア解析の結果と一致しない。これをどう考えるか, 今後の課題であろう。

W.F. Budd (オーストラリア, メルボルン大学) はメルボルン大の GCM を用いたパッシブトレーサー輸送モデルを使った理想的な条件での拡散実験について発表した。初日の Tans, このセッションの Genthon や Budd などの発表に見られるように, 3次元トレーサーモデルはもう既に広く使われだしているという印象を受けた。

そのほか, ポスター発表が8件あった。その中で, G.J. Berri ら (アルゼンチン, ブエノスアイレス大学) のトラジェクトリが初期の解析値に敏感であるという発表や, B.B. Murphey (ジョージア工科大) による1983年9月のストームによって成層圏のオゾンがマクマード基地の地上まで降下し, 南極点で異常昇温したケースの

解析 (J. Appl. Met. 1991) などが印象に残った。

初めて訪れるデンバー, ボールダーは西に雪を頂いたロッキーの山並を配した平野にあり, 東に草原が広がることを除けば, 信州松本平のごときであった。宿舎のホテルからコロラド大学の会場まで, ボールダークリークの流れを緩やかに登って行く路は, 上高地を思わせる。惜しむらくは, 雪帽子を被ったロッキーが手前の山に遮られてほんの少ししかみえない事であろう。いつの日か, のんびりと訪れてみたいと思いつつ, 帰国の途についた。

セッション 5 B : 対流圏一成層圏交換

松原 廣司

南極対流圏での化学過程を議論するばあいには低緯度からの輸送及び成層圏と対流圏の交換過程が重要である。しかし, 日本の37倍もある南極では大陸周辺にほとんどの基地が存在しており, 交換過程を議論する上では余りにも観測点が少なすぎる。もっとも, それが故に取得・解析した結果は研究者のこの課題に対する取り組み方が前面に出て面白いのだが。

このセッションでは, 口頭2編, ポスター5編, 計7編が発表された。主催者もこのセッションの扱いに困ったのだろうか, 1991年にフランス基地に設置する予定のライダーシステムの紹介を含めて種々の分野の話題がこのセッションに集中していた。日本からは山崎(気象研)が招待講演でトレーサーの南極域への輸送について数値モデル計算結果を紹介し, 筆者は1987年から4年間行われた「しらせ」船上オゾン観測結果と結果から考えられる南極域へのオゾン輸送の概念を模式図を用いて紹介した。手前味噌ではあるが, 日本からの発表は注目度が高かった方に属するだろう。

本セッションで対流圏一成層圏交換過程に的をしばった発表について以下に紹介する。

A.N. Grunzdev (ソ連, 大気物理研究所) は, 極点基地のオゾンゾンデ観測結果からオゾンホールにともない成層圏下部のオゾンが対流圏に運ばれる可能性があることを定量的に解析した。

E. Robinson (NOAA/マウナロア観測所) は, 航空機による観測結果から, 山岳波にともなう成層圏と対流圏の物質交換について紹介した。

WMOの会議で外国へ出張した経験は何度かあるもののシンポジウムへの参加は40半ばにして初めてであった。最初はそばでの話し声が皆雑音に聞こえてきたが最

終日頃になりやっとなじんできた。もっと若いうちに外国で開かれるこの種の会議に出席できたら得るものが大きいのではないか。それにしても有給休暇を使い、旅費と宿泊費を自分で払い、わが家の家計の赤字がまた増えた。来年の国際オゾンシンポジウムに日本からどのくらい参加するのだろうか、私も行ったら赤字がもっと増えるなど思いながら窮屈なエコノミー座席で飲んだビールはほろ苦かった。

セッション6：大気-地表交換過程

大和 政彦

T. Staffelbach ら (スイス, ベルン大学) は, 南極, 中央グリーンランドの頂上の雪と氷の過酸化水素 (H_2O_2), ホルムアルデヒドの濃度変動を調べ, 大気と雪氷の間の輸送機構を議論した. 酸素同位体比 ($\delta^{18}O$) の測定例, H_2O_2 の光解離による OH ラジカル生成, CH_4 と OH ラジカルとの反応の関係も示し, H_2O_2 濃度は, 逆転層などの大気の鉛直構造に依存することを示した.

金森ら (名大水圏研) は, 南極のエロゾルを12段のアンダーセンサンプラーで採集し, エロゾルの空間変化, 季節変化を調べた. 硫酸イオン (SO_4^{2-}) と MSA は, 夏に多く, 冬に少ないという同様な季節変化をしており, 粒径分布も同じ形で, 同一の発生源が示唆され, 興味深い結果を提出している. NO_3^- は, SO_4^{2-} , MSA とは起源が異なることを示した. また, 夏季の塩素消失は, おそらく硫酸粒子との反応によるものと考えられた.

Y. Gjessing (ノルウェー, ベルゲン大学) は, 海塩の化学成分の SO_4^{2-} の分率が, Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ に較べ少ない理由として, 海水の飛沫が凍結して化学的に分離された後, 南極内陸へ輸送されることを主張した. 微小水滴の凍結温度についてのコメントがあった.

S. Harder と R.J. Charlson (ワシントン大学) は,

硫酸塩エロゾルの南極雪氷面への沈着過程の解明を目的とし, アイスコアの中の硫酸塩の時間変化, 大気中の凝結核濃度の季節変化を測定した. また, 雪に穴を掘り, 雪の間隙を通して凝結核濃度を測定し, 濃度が $1/e$ に減少する深さも求めている.

A.L. Dick (ニュージーランド, 科学工業研究所) は, 海塩粒子, 硫酸粒子, 土壌粒子, 重金属, $nss-SO_4^{2-}$, MSA, NO_3^- , MSA/ $nss-SO_4^{2-}$ といった南極対流圏中のエロゾル粒子の組成の研究, その発生・輸送・沈着過程, 表面雪での過程, 雪層内への閉じこめといったエロゾルの大気から雪氷への輸送・沈着過程の研究に関する現在の知識をレビューし, 気球による観測の方法などを提案した.

A.W. Hogan と A.J. Gow (米国陸軍低温域技術研究所) は, 南極点での大気中のエロゾルの濃度変動と雪氷中の Na^+ の濃度変動の間にみられる半年の時間のずれに関して, エロゾルの重力落下及び凝集, 過冷却水滴の雪氷面への付着凍結, 水蒸気の雪氷面への昇華, 飛雪輸送, 浮遊氷晶への付着落下など, 雪氷面への物質の輸送過程と結びつけて議論した.

S.G. Warren (ワシントン大学) と A.D. Clarke (ハワイ大学) は, 南極点付近とポストーク基地でアルベドや雪サンプル中のスス粒子量を調査し, 雪のアルベド測定値は, 基地からの汚染物質の影響をあまり受けず, その周辺領域の代表値であることを示した. スス粒子は, 今後, 南極への汚染大気の侵入のトレーサーとして調査に活用される.

神山 (京都大学) は, 南極, 東クイーンモードランドの表面雪層の H_2O_2 の鉛直分布を調べた. H_2O_2 , Cl^- , NO_3^- 濃度が高く, pH が低く, 人工放射性核種濃度が高いことから, 内陸高原の雪は上層大気の状態を反映していると結論した.